نشریهٔ مهندسی عمران فردوسی DOI: 10.22067/civil.v31i1.49178 سال سی و یکم، شمارهٔ دو، ۱۳۹۷

تأثیر الگوی بارگذاری جانبی مختلف بر موقعیت بهینهٔ مهار بازویی و کمربند خرپایی در ساختمان‌های بلند★

(یادداشت پژوهشی)

بهناز حیدری قبادی اسکی[۱] حمیدرضا توکلی[۲] حامد حمیدی[۳] رضا رهگذر[٤]

چکیده در این پژوهش تاثیر الگوی بارگذاری گسترده جانبی مستطیلی، مثلثی و ذوزنقه‌ای بر موقعیت بهینه مهار بازویی و کمربند خرپایی با استفاده از معیار انرژی مورد بررسی قرار گرفته است. اثر سیستم مهار بازویی، کمربند خرپایی بر هسته مهاربندی به صورت فنر پیچشی در محل قرارگیری مهاربازویی و کمربند خرپایی درنظر گرفته شده است. محل بهینه‌ی فنر، با ماکزیمم شدن انرژی جذب شده توسط فنر بدست می‌آید. موقعیت بهینه‌ی مهار بازویی و کمربند خرپایی تحت تاثیر سه نوع الگوی بارگذاری جانبی برای سازه‌ای با یک، دو، سه و چهار مهار بازویی و کمربند خرپایی محاسبه شده است. نتایج حاصله با استفاده از روش پیشنهادی با نتایج بدست آمده از آنالیز کامپیوتری، برای یک ساختمان بلند ٦٠ طبقه مقایسه شده است. نتایج بدست آمده بیانگر دقت قابل قبول روش پیشنهادی می‌باشد که به تخمین خوبی از پاسخ سازه واقعی منجر می‌گردد.

واژه‌های کلیدی الگوی بارگذاری جانبی، موقعیت بهینه، مهار بازویی و کمربند خرپایی، ساختمان‌های بلند، معیار انرژی.

The Effect of Lateral Load Pattern on Optimum Location of Outrigger and Belt Truss in Tall Buildings

B. Heidary GhobadiAski H. R. Tavakoli H. Hamidi R. Rahgozar

Abstract *In this paper, the effect of rectangular, triangular and trapezoidal lateral loadings pattern on the optimum location of outrigger and belt truss based on energy concept have been investigated. The effect of outrigger-belt truss on shear core system response is modeled by a rotational spring at the outrigger-belt truss location. Optimum location of this spring is obtained when energy absorbed by the spring is maximized. Optimum location of outrigger and belt truss under the effect of three types of lateral loadings pattern for structure with one, two, three and four outriggers and belt trusses is calculated. Results obtained from the proposed method for 60 story tall building are compared to those obtained using a standard finite element computer package. The approximate analyses are found to yield reasonable results and give a fairly good indication of actual structure's response.*

Key Words Lateral Loading Pattern, Optimum Location, Outrigger and Belt Truss, Tall Buildings, Energy Criterion.

★ تاریخ دریافت مقاله ٩٤/٥/٢٦ و تاریخ پذیرش آن ٩٥/٦/٢٧ می‌باشد.

(۱) دانشجوی کارشناسی ارشد زلزله، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل.

(۲) نویسندهٔ مسئول: استادیار دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل. Email: tavakoli@nit.ac.ir

(۳) استادیار دانشکدهٔ مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل.

(٤) استاد دانشکدهٔ مهندسی عمران، دانشگاه شهید باهنر کرمان.

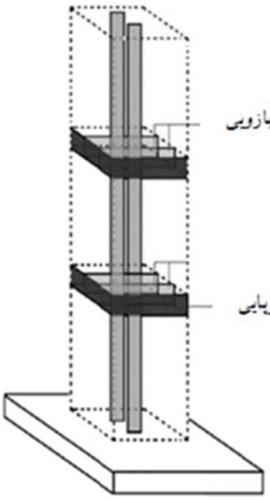
مقدمه

ساختمان‌های بلند نه تنها نماد رونق اقتصادی و پیشرفت اجتماعی هستند، بلکه ترکیبی از مهندسی سنتی و تکنولوژی‌های نوین می‌باشند [1]. با افزایش جمعیت و عدم فضاهای باز کافی، ساخت ساختمان‌های بلند روز به روز محبوب‌تر می‌شوند و با وجود چالش‌های طراحی پیش رو، ساخت‌وساز و هزینه‌های زیاد همچنان به‌طور چشمگیری در سراسر جهان در حال ساخت هستند. رشد و توسعه ساختمان‌های بلند مستلزم عوامل مختلفی از قبیل اقتصاد، زیبایی شناسی، فناوری، مقررات شهری و سیاست است که در این میان اقتصاد، اصلی‌ترین فاکتور کنترل کننده می‌باشد [2].

سیستم‌های دوگانه یا سه‌گانه در ساختمان‌های بلند که شامل دو یا سه المان سازه‌ای همچون قاب و دیوارهای برشی هستند، برای بدست آمدن یک سازه مقاوم دربرابر باد و زلزله‌های قوی مورد استفاده قرار می‌گیرند [1].

کنترل تغییر مکان جانبی و لنگر فونداسیون در هسته‌ی یک ساختمان بلند تحت بارهای جانبی، دو نگرانی اصلی در طراحی ساختمان‌های بلند شده است. سیستم‌های سازه‌ای مختلفی برای کنترل تغییر مکان جانبی ساختمان‌های بلند ابداع شدند. سیستم مهار بازویی و کمربند خرپایی معمولا به عنوان یکی از سیستم‌های موثر برای کنترل دریفت در اثر بارهای جانبی می‌باشد به‌طوری که در هنگام بارگذاری، آسیب‌های سازه‌ای و غیر سازه‌ای به حداقل برسند. این سیستم همچنین به عنوان یکی از موثرترین روش‌های افزایش سختی سازه‌ای ساختمان‌های بلند در نظر گرفته شده و در چند دهه‌ی اخیر به‌طور گسترده‌ای مورد مطالعه قرار گرفته است [3-9]. یکی از مزایای استفاده از مهار بازویی و کمربند خرپایی در ساختمان، افزایش سختی سازه‌ای و کنترل دریفت بین طبقات تحت بارهای جانبی می‌باشد. علاوه بر این لنگر واژگونی نیز می‌تواند بین قاب پیرامونی و دیوارهای هسته مرکزی، توسط مهارهای بازویی متعادل شود [1].

سیستم مهار بازویی و کمربند خرپایی، شکل اصلاح شده‌ی قاب‌های مهاربندی و قاب با دیوار برشی می‌باشد. در این سیستم مهندسان با استفاده از مهارهای بازویی، هسته را به ستون‌های خارجی متصل می‌کنند (شکل ۱).



شکل ۱ سیستم مهاربازویی – کمربند خرپایی [11]

بنابراین ستون‌ها علاوه بر عملکرد سنتی تحمل بارهای ثقلی، از حرکات جانبی ساختمان جلوگیری می‌کنند [10]. در سال ۱۹۷٤ اولین ساختمان با این سیستم سازه‌ای ساخته شده است، که ساختمان فلزی فرست ویسکانسین سنتر واقع در میلواکی در کشور نیویورک بوده است. این ساختمان ٤۲ طبقه دارای سه کمربند خرپایی است که در پایین، وسط و بالای ساختمان واقع شده‌اند. تجهیزات مکانیکی نیز در طبقات دارای کمربندهای خرپایی واقع شده‌اند [11].

مطالعهٔ پارامتریک برای طراحی بهینهٔ ساختمان‌های بلند اهمیت بسیاری دارد. از آنجایی که معمولا مطالعات پارامتریک شامل تعداد زیادی آنالیز هست و در صورت استفاده از مدل‌های پیچیده اجزای محدودی، زمان اجرای برنامه افزایش خواهد یافت، لذا مدل‌های ساده شده بسیار مورد علاقه مهندسان و محققان هستند [12].

اولین بار تارانا (۱۹۷۵)، مهار بازویی را به صورت یک تیر صلب مدل نمود و محل بهینه مهار بازویی و کمربند خرپایی را، تحت بار گسترده یکنواخت محاسبه کرده و پیشنهاد داد که محل بهینهی یک مهاربازویی، نزدیک به میانه ارتفاع ساختمان (۰/٤٥٥ ارتفاع کل ساختمان از بالا) باشد [3]. استافورد اسمیت و ایروان سلیم (۱۹۸۱)، صلبیت خمشی مهار بازویی را وارد محاسبات کرده و موقعیت بهینه را تحت بار گسترده یکنواخت محاسبه نمودند. در مطالعات آنها محل‌های بهینهٔ مهارهای بازویی، کاهش دریفت بالای ساختمان و لنگر پایه، با یک پارامتر بی بعد که تابعی از نسبت‌های صلبیت خمشی سیستم هسته به ستون و سیستم هسته به مهاربازویی می‌باشد، بیان شده است [5]. روتنبرگ و تال (۱۹۸٦)، نتایج یک ارزیابی روی کاهش دریفت، برای سازه‌هایی با مهارهای بازویی صلب، را ارائه دادند و محل بهینه را تحت بار گستردهٔ مثلثی و متمرکز محاسبه نمودند [13]. هاندر کمپ و باکر (۲۰۰۳)، علاوه بر صلبیت خمشی مهار بازویی و هسته، صلبیت برشی را نیز لحاظ کرده و محل بهینهٔ یک سازه شامل قاب مهاربندی با مهاربازویی را تحت بار گسترده یکنواخت محاسبه نمودند [14,15]. خیرالدین و میراسمعیل (۱۳۸۹)، موقعیت بهینه را با درنظر گرفتن تغییرشکل‌های خمشی و برشی مهار بازویی و هسته و تغییر شکل‌های محوری ستون‌های خارجی محاسبه نمودند [16]. رهگذر و جهانشاهی (۲۰۱۳)، روشی برای تعیین محل بهینهٔ یک مهاربازویی و کمربند خرپایی با استفاده از ماکزیمم کردن انرژی کرنشی سیستم مهار بازویی و کمربند خرپایی ارائه نمودند و محل بهینه را با صفر قرار دادن مشتق معادله انرژی نسبت به محل قرارگیری سیستم مهاربازویی محاسبه کردند [۱۷].

هدف این کار پژوهشی گسترش تحقیقات انجام شدهٔ رهگذر و جهانشاهی، مرتبط با یافتن محل بهینهٔ چهار مهاربازویی و کمربندخرپایی تحت بارهای گسترده یکنواخت، مثلثی و ذوزنقه‌ای می‌باشد. توسعهٔ تحقیقات شامل: اولا تغییر الگوی بارگذاری به شکل ذوزنقه‌ای و ثانیا تعیین محل بهینه‌ی بیش از یک مهاربازویی و کمربندخرپایی استفاده شده در ساختمان بلند می‌باشد. باتوجه به اینکه اکثر تحقیقات انجام شده بر پایه بار جانبی مستطیلی شکل می‌باشند، لذا در این تحقیق، الگوی بارگذاری جانبی ذوزنقه‌ای نیز برای نزدیک‌تر شدن به ماهیت واقعی بار باد لحاظ شده است. با توجه به این‌که در اکثر آیین‌نامه‌های بارگذاری، توزیع بار جانبی باد را به صورت سهمی در نظر می‌گیرند، بدین منظور با تقریب مناسبی بار جانبی ذوزنقه‌ای نیز منظور شده است.

به منظور بررسی دقت نتایج حاصله از مدل ساده شده، یک مدل پیچیده با استفاده از برنامه ایتبس ساخته شده است. براساس مقایسه نتایج بدست‌آمده از نمودارها، دقت روش بکار رفته سنجیده شده است. در این مقاله فرمول بندی مدل ساده شده ارائه شده است و دقت و کارآمدی آن نیز گزارش شده است.

تعریف سیستم مهار بازویی - کمربند خرپایی و فرضیات مدلسازی

از لحاظ سازه‌ای اسکلت اولیه یک ساختمان بلند می‌تواند به عنوان یک تیر طره قائم با پایه گیردار در زمین مشاهده شود و به صورت یک تیر قوطی شکل طره مدل شود. محل کمربندخرپایی و مهار بازویی تاثیر مستقیمی روی کارآمدی کنترل تغییر مکان افقی در ساختمان‌های بلند دارد. محل مناسب کمربندخرپایی و مهار بازویی در به حداقل رساندن تغییرمکان افقی و کاهش لنگرهای گیرداری کارآمدتر خواهد بود [18].

بدین منظور یک مدل ساده شدهٔ تیر طره برای ساختمان‌های بلند توسعه داده شده است. در این مدل، هسته به عنوان تیر طره و مهارهای بازویی به عنوان

اجسام صلب درنظر گرفته شدند [۱۷].

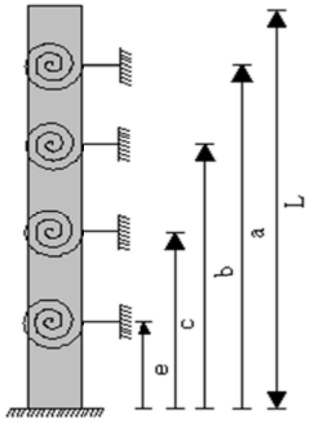
اثر مهارهای بازویی و کمربندهای خرپایی روی هسته مرکزی با فنرهای پیچشی در محل مهارهای بازویی و کمربندهای خرپایی مدل شده‌اند [۱۷]. محل بهینه فنر، زمانی که انرژی جذب شده توسط فنرها ماکزیمم شود بدست می‌آید [16]. با حل مشتق معادلات انرژی نسبت به محل قرارگیری فنرها از پای سازه توسط نرم‌افزار متلب، بهترین مکان مهارهای بازویی و کمربندهای خرپایی بدست آمده است.

فرضیات حاکم بر مدلسازی، با کمک گرفتن از روش ارائه شده تارانا [۱۷] و رهگذر و همکاران [16] به شرح زیر می‌باشد:

۱. رفتار سازه الاستیک خطی است.
۲. خواص هندسی مقطع هسته، ستون‌ها و مهارهای بازویی در راستای ارتفاع یکنواخت می‌باشد.
۳. مهارهای بازویی به صورت صلب به هسته و به صورت مفصلی به ستون‌های خارجی متصل هستند.
٤. مهارهای بازویی صلب درنظر گرفته شده‌اند.
٥. اثرات مهارهای بازویی و کمربندهای خرپایی در تراز متصل به هسته به صورت فنر پیچشی درنظر گرفته شده‌اند.

آنالیز سازه با چهار مهار بازویی و کمربند خرپایی

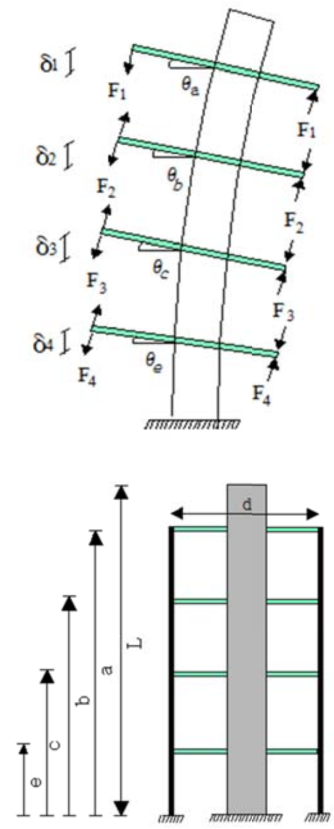
مدل انتخابی برای آنالیز سازه با چهار مهار بازویی مطابق شکل (۲) بوده که دارای چهار فنر پیچشی در ترازهای a, b, c, e می‌باشد. مهارهای بازویی و کمربندهای خرپایی به صورت فنرهای پیچشی درنظر گرفته شده‌اند و به صورت لنگرهای متمرکز در خلاف جهت دوران ناشی از بارهای جانبی مقاومت کرده و باعث کاهش تغییرشکل بالای تیر طره و کاهش لنگر پای سازه می‌شوند [۱۷].



شکل ۲ مدل تحلیلی سازه بلند با چهار مهار بازویی و کمربند خرپایی

محاسبهٔ چرخش فنرها

محاسبه روابط چرخش‌های مهارهای بازویی. اگر A سطح مقطع ستون‌های خارجی و E مدول الاستیسیته هسته مرکزی باشد باتوجه به شکل (۳) داریم:



شکل ۳ معادل‌سازی لنگر فنرهای پیچشی با کوپل نیروها

$$\delta_1-\delta_2=\frac{F_1\,(a-b)}{EA} \quad (۱)$$

$$\delta_2-\delta_3=\frac{F_2\,(b-c)}{EA} \quad (۲)$$

$$\delta_3-\delta_4=\frac{F_3\,(c-e)}{EA} \quad (۳)$$

$$\delta_4=\frac{F_4\,e}{EA} \quad (٤)$$

$$\theta_a=\frac{\delta_1}{d/2} \quad (۵)$$

$$\theta_b=\frac{\delta_2}{d/2} \quad (٦)$$

$$\theta_c=\frac{\delta_3}{d/2} \quad (۷)$$

$$\theta_e=\frac{\delta_4}{d/2} \quad (۸)$$

مطابق شکل (۳)، اگر M لنگر حاصل از کوپل نیروهای وارده به مهارهای بازویی باشد:

$$M_a=F_1 d \quad (۹)$$

$$M_b=(F_2-F_1)d \quad (۱۰)$$

$$M_c=(F_3-F_2)d \quad (۱۱)$$

$$M_e=(F_4-F_3)d \quad (۱۲)$$

اگر میزان چرخش فنر اول θ_e ، میزان چرخش فنر دوم θ_c ، میزان چرخش فنر سوم θ_b و میزان چرخش فنر چهارم θ_a باشند، خواهیم داشت:
از ترکیب روابط (۱) تا (۱۲) نتیجه می شود:

$$\theta_a=\frac{M_a a+M_b b+M_c c+M_e e}{EAd^2/2} \quad (۱۳)$$

$$\theta_b=\frac{(M_a+M_b)b+M_c c+M_e e}{EAd^2/2} \quad (١٤)$$

$$\theta_c=\frac{(M_a+M_b+M_c)c+M_e e}{EAd^2/2} \quad (۱۵)$$

$$\theta_e=\frac{(M_a+M_b+M_c+M_e)e}{EAd^2/2} \quad (١٦)$$

با استفاده از روابط (۱۳)، (١٤)، (۱۵) و (١٦) مقادیر M_a, M_b, M_c و M_e بدست می‌آیند:

محاسبه روابط چرخش‌های هسته مرکزی. زاویه چرخش هسته مرکزی در محل مهارهای بازویی به نوع بارگذاری وارد بر سازه وابسته است. در این مقاله برای سه حالت بارگذاری گسترده یکنواخت، گسترده مثلثی و ذوزنقه‌ای، مقادیر چرخش‌های هسته مرکزی در نقاط a، b، c، e محاسبه شده است.

بارگذاری گسترده یکنواخت. مطابق شکل (٤) وقتی مجموعه تحت بارگذاری گسترده یکنواخت قرار گیرد، زاویه چرخش در نقاط a ، b، c، e مطابق مراحل زیر قابل محاسبه است:

$$M_a=\frac{EAd^2}{2}\frac{\theta_a-\theta_b}{a-b} \quad (۱۷)$$

$$M_b=\frac{EAd^2}{2}\frac{(c-b)\theta_a+(a-c)\theta_b+(b-a)\theta_c}{(a-b)(b-c)} \quad (۱۸)$$

$$M_c=\frac{EAd^2}{2}\frac{(c-e)\theta_b+(b-e)\theta_c+(c-b)\theta_e}{(b-c)(c-e)} \quad (۱۹)$$

$$M_e=\frac{EAd^2}{2}\frac{c\theta_e-e\theta_c}{e(c-e)} \quad (۲۰)$$

طبق اصل جمع آثار قوا، θ_a برابر با $\theta_{a,1}$ (حاصل از بار جانبی بدون فنر) و $\theta_{a,2}$ (حاصل از لنگر M_e به دلیل وجود فنر e) و $\theta_{a,3}$ (حاصل از لنگر M_c به دلیل وجود فنر c) و $\theta_{a,4}$ (حاصل از لنگر M_b به دلیل وجود فنر b) و $\theta_{a,5}$ (حاصل از لنگر M_a به دلیل وجود فنر a) است.

$$\theta_a=\theta_{a,1}+\theta_{a,2}+\theta_{a,3}+\theta_{a,4}+\theta_{a,5} \quad (۲۱)$$

مطابق شکل (٤-ب)، چرخش سازه در مقطعی به فاصله x از پای سازه برابر است با:

$$\theta_{x,1}=\frac{1}{EI}\int_0^x M_x d_x \quad (۲۲)$$

و رابطه M_x برای شکل الف به صورت زیر می‌باشد:

$$M_x = wLx - \frac{wL^2}{2} - \frac{wx^2}{2} \quad (۲۳)$$

با جایگذاری رابطه (۲۳) در (۲۲) داریم:

$$\theta_{x,1} = \frac{1}{EI}\left(\frac{wLx^2}{2} - \frac{wL^2x}{2} - \frac{wx^3}{6}\right) \quad (۲٤)$$

بنابراین مقدار $\theta_{x,1}$ در نقطه a برابر خواهد بود با:

$$\theta_{a,1} = \frac{1}{EI}\left(\frac{wLa^2}{2} - \frac{wL^2a}{2} - \frac{wa^3}{6}\right) \quad (۲۵)$$

برای محاسبه $\theta_{a,2}$ حاصل از لنگر M_e:

$$\theta_{x,2} = \frac{1}{EI}\int_0^x M_x d_x \quad (۲٦)$$

با توجه به شکل(٤) و پس از انتگرال گیری خواهیم داشت:

$$\theta_{a,2} = \frac{-M_e e}{EI} \quad (۲۷)$$

$$\theta_{a,3} = \frac{-M_c c}{EI} \quad (۲۸)$$

$$\theta_{a,4} = \frac{-M_b b}{EI} \quad (۲۹)$$

$$\theta_{a,5} = \frac{-M_a a}{EI} \quad (۳۰)$$

با جایگذاری روابط (۲۵) ، (۲۷) ، (۲۸) ، (۲۹) ، (۳۰) در رابطه (۲۱) داریم:

$$\theta_a = \frac{\left(\frac{wLa^2}{2} - \frac{wL^2a}{2} - \frac{wa^3}{6}\right) - (M_a a + M_b b + M_c c + M_e e)}{EI} \quad (۳۱)$$

طبق روابط سازگاری تغییر شکل‌ها در مهار بازویی و هسته مرکزی در نقطه a، مقدار θ_a در رابطه (۳۱)باید با مقدار بدست آمده برای θ_a در رابطه (۱۳) برابر باشند:

$$M_a a + M_b b + M_c c + M_e e = \theta_a\, EAd^2/2 \quad (۳۲)$$

از ترکیب روابط (۳۱) و (۳۲) نتیجه می‌شود:

$$\theta_a = \frac{\left(\frac{wLa^2}{2} - \frac{wL^2a}{2} - \frac{wa^3}{6}\right)}{EI + EAd^2/2} \quad (۳۳)$$

به همین ترتیب برای θ_b و θ_c و θ_e روابط زیر بدست آمدند:

$$\theta_b = \frac{\left(\frac{wLb^2}{2} - \frac{wL^2b}{2} - \frac{wb^3}{6}\right)}{EI + EAd^2/2} \quad (۳٤)$$

$$\theta_c = \frac{\left(\frac{wLc^2}{2} - \frac{wL^2c}{2} - \frac{wc^3}{6}\right)}{EI + EAd^2/2} \quad (۳۵)$$

$$\theta_e = \frac{\left(\frac{wLe^2}{2} - \frac{wL^2e}{2} - \frac{we^3}{6}\right)}{EI + EAd^2/2} \quad (۳٦)$$

اگرروابط (۱۷)، (۱۸)، (۱۹)و (۲۰) را در رابطه (۳۷) جایگذاری کنیم خواهیم داشت:

$$E = \frac{1}{2}M_a\theta_a + \frac{1}{2}M_b\theta_b + \frac{1}{2}M_c\theta_c + \frac{1}{2}M_e\theta_e \quad (۳۷)$$

$$E = \frac{1}{4}EAd^2\left\{\frac{\theta_a-\theta_b}{a-b} + \frac{(c-b)\theta_a+(a-c)\theta_b+(b-a)\theta_c}{(a-b)(b-c)} + \frac{(c-e)\theta_b+(b-e)\theta_c+(c-b)\theta_e}{(b-c)(c-e)} + \frac{c\theta_e-e\theta_c}{e(c-e)}\right\} \quad (۳۸)$$

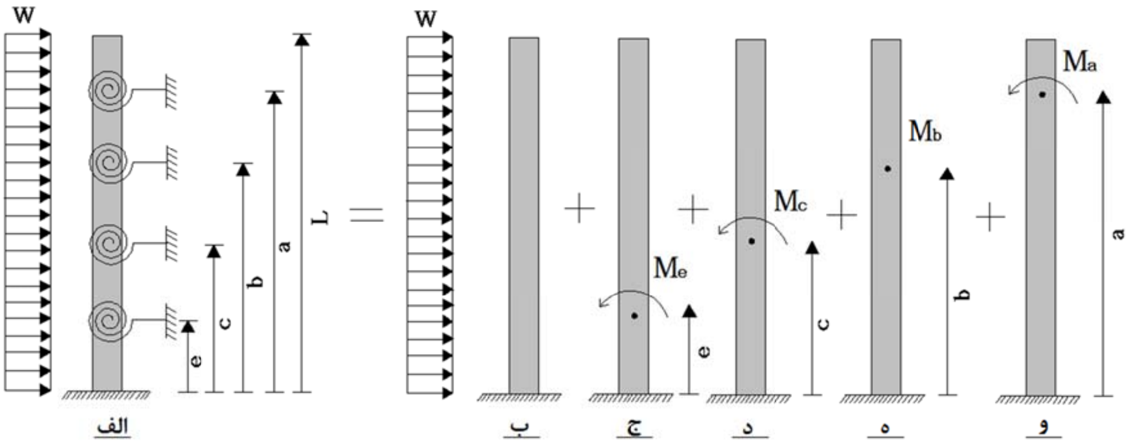
در رابطه (۳۸) رابطه انرژی برحسب متغیرهای a, b, c, e بیان می شود. اگر مشتقات جزیی رابطه انرژی نسبت به متغیرهای a, b, c, e را برابر صفر قرار دهیم، با توجه به اینکه مجبور به حل دستگاه معادلات غیرخطی می‌شویم، درنتیجه با استفاده از کدنویسی در نرم‌افزار متلب، دستگاه معادلات غیرخطی به روش عددی حل شده و موقعیت بهینه مهارهای بازویی و کمربندهای خرپایی بدست آمد.

$$\frac{\partial E}{\partial a} = 0 \quad (۳۹)$$

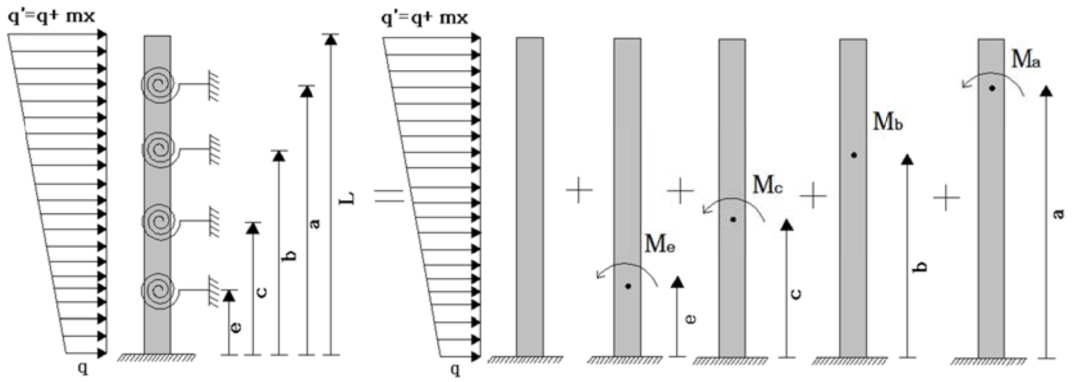
$$\frac{\partial E}{\partial b} = 0 \quad (٤۰)$$

$$\frac{\partial E}{\partial c} = 0 \quad (٤۱)$$

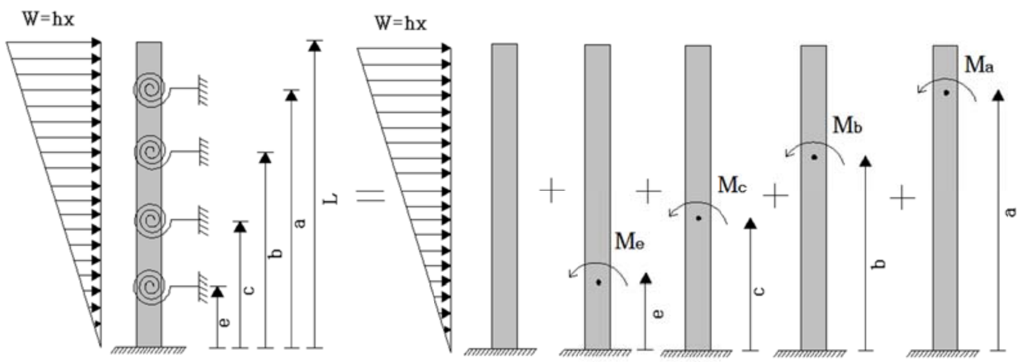
$$\frac{\partial E}{\partial e} = 0 \quad (٤۲)$$



شکل ٤ مدل تحلیلی سازه بلند با چهار مهار بازویی و کمربند خرپایی تحت بار گسترده یکنواخت



شکل ۵ مدل تحلیلی سازه بلند با چهار مهار بازویی و کمربند خرپایی تحت بار گسترده مثلثی



شکل ٦ مدل تحلیلی سازه بلند با چهار مهار بازویی و کمربند خرپایی تحت بار گسترده ذوزنقه ای

بارگذاری گسترده مثلثی. در این حالت کلیه مراحل محاسبات همانند حالت بارگذاری گسترده یکنواخت می‌باشد، تنها تفاوت مربوط به زاویه چرخش حاصل از بار گسترده مثلثی است.

$$\theta_a=\frac{\left(\frac{hL^2a^2}{4}-\frac{hL^3a}{3}-\frac{ha^4}{24}\right)}{EI+EAd^2/2} \qquad (٤٣)$$

$$\theta_b=\frac{\left(\frac{hL^2b^2}{4}-\frac{hL^3b}{3}-\frac{hb^4}{24}\right)}{EI+EAd^2/2} \qquad (٤٤)$$

$$\theta_c=\frac{\left(\frac{hL^2c^2}{4}-\frac{hL^3c}{3}-\frac{hc^4}{24}\right)}{EI+EAd^2/2} \quad (٤٥)$$

$$\theta_e=\frac{\left(\frac{hL^2e^2}{4}-\frac{hL^3e}{3}-\frac{he^4}{24}\right)}{EI+EAd^2/2} \quad (٤٦)$$

بارگذاری گسترده ذوزنقه‌ای. در این حالت نیز کلیه مراحل محاسبات همانند حالت بارگذاری گسترده یکنواخت می‌باشد، تنها تفاوت مربوط به زاویه چرخش حاصل از بار گسترده ذوزنقه‌ای می‌باشد.

$$\theta_a=\frac{\left(\frac{(2qL+mL^2)a^2}{8}-\frac{(3qL^2+2mL^3)a}{6}-\frac{qa^3}{6}-\frac{ma^4}{24}\right)}{EI+EAd^2/2} \quad (٤٧)$$

$$\theta_b=\frac{\left(\frac{(2qL+mL^2)b^2}{8}-\frac{(3qL^2+2mL^3)b}{6}-\frac{qb^3}{6}-\frac{mb^4}{24}\right)}{EI+EAd^2/2} \quad (٤٨)$$

$$\theta_c=\frac{\left(\frac{(2qL+mL^2)c^2}{8}-\frac{(3qL^2+2mL^3)c}{6}-\frac{qc^3}{6}-\frac{mc^4}{24}\right)}{EI+EAd^2/2} \quad (٤٩)$$

$$\theta_e=\frac{\left(\frac{(2qL+mL^2)e^2}{8}-\frac{(3qL^2+2mL^3)e}{6}-\frac{qe^3}{6}-\frac{me^4}{24}\right)}{EI+EAd^2/2} \quad (٥٠)$$

تعیین موقعیت بهینه مهارهای بازویی با استفاده از نتایج تحلیل

برای تعیین موقعیت بهینه مهارهای بازویی و کمربندهای خرپایی، باید محلی را پیدا نمود که انرژی جذب شده توسط فنرهای پیچشی، در آن مکان‌ها حداکثر شود. تعیین این محل مطابق معادلات (٣٩)، (٤٠)، (٤١) و (٤٢) با صفر قرار دان مشتق معادله انرژی نسبت به محل قرارگیری فنرها از پای سازه محاسبه می‌شود [16].

موقعیت بهینه مهارهای بازویی و کمربندهای خرپایی در مدل ارائه شده در این تحقیق برای حالات مختلف بارگذاری و تعداد چهار مهار بازویی و کمربند خرپایی در جداول (١)، (٢)، (٣) ارائه شده است (مبنای محاسبه پای سازه می‌باشد).

جدول ٢ موقعیت بهینه مهار بازویی و کمربند خرپایی تحت بار گسترده مثلثی

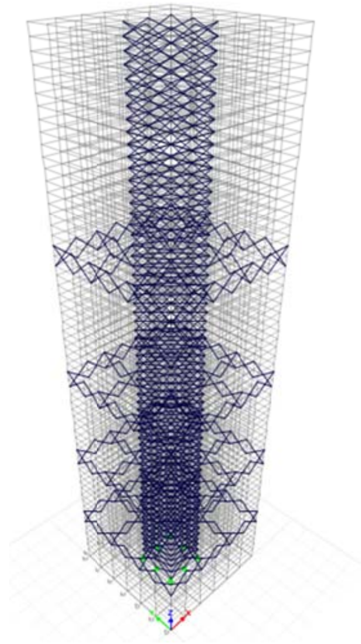
تعداد مهار بازویی و کمربند خرپایی	موقعیت بهینه (بر حسب L)			
١	٠/٥٧١			
٢	٠/٢٨	٠/٦٢		
٣	٠/٢٠٨١	٠/٤٢٩٩	٠/٦٩٥٤	
٤	٠/١٦٢١	٠/٣٣٠٤	٠/٥١٤٣	٠/٧٣٨٥

جدول ٣ موقعیت بهینه مهار بازویی و کمربند خرپایی تحت بار گسترده ذوزنقه‌ای

تعداد مهار بازویی و کمربند خرپایی	موقعیت بهینه (بر حسب L)			
١	٠/٤٨٤٥			
٢	٠/٢٨٦	٠/٦٢١٤		
٣	٠/٢٠٣٨	٠/٤٢٤٤	٠/٦٩١٢	
٤	٠/١٥٨٥	٠/٣٢٥١	٠/٥٠٨٩	٠/٧٣٤٧

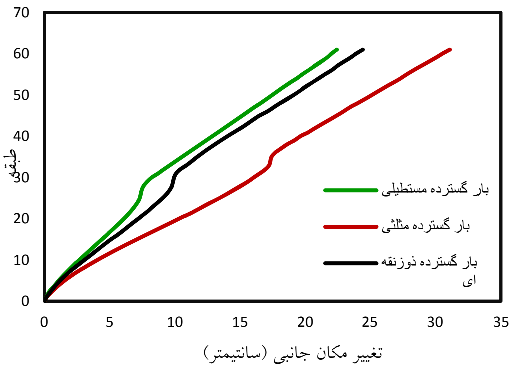
مطالعه موردی

به منظور بررسی دقت روش ارائه شده، یک ساختمان بلند ۶۰ طبقه فولادی با سیستم ترکیبی قاب فولادی کمربند خرپایی مهار بازویی که در معرض بار گسترده ذوزنقه‌ای قرار گرفته و در شکل (۷) نشان داده شده است، مورد بررسی قرار داده شد. مشخصات زیر در مثال عددی استفاده شده است: تمام مقاطع ستون‌ها ۰/۸×۰/۸ متر و در ارتفاع سازه ثابت می‌باشند. ارتفاع هر طبقه ۳/۳ متر و فاصله مرکز تا مرکز ستون‌ها ۸ متر می‌باشد. ابعاد پلان ساختمان ۴۸×۴۸ متر می‌باشد. مدول الاستیسیته ۲۱ گیگا پاسکال و نسبت پواسون ۰/۳ می‌باشد.

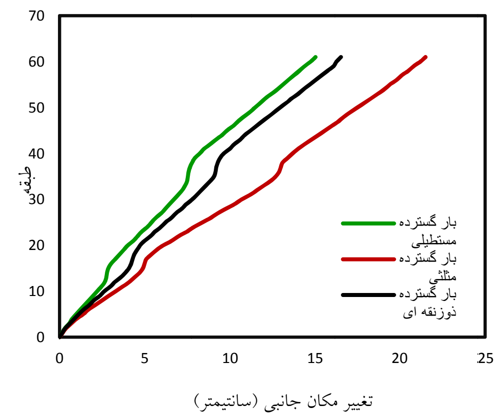


شکل ۷ مدل ایتبس

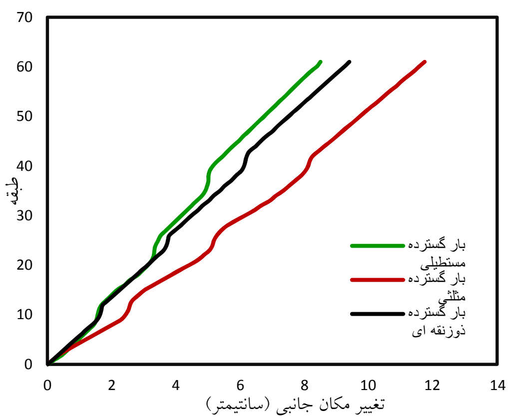
شکل‌های (۸) تا (۱۱) تغییر مکان جانبی ساختمان ۶۰ طبقه مذکور را تحت الگوهای مختلف بارجانبی گسترده مستطیلی، مثلثی و ذوزنقه‌ای نشان می‌دهند. چنان‌چه در شکل‌ها مشخص است، در شکل (۸) سازه تحت یک مهار بازویی و کمربند خرپایی، در شکل (۹) تحت دو مهار بازویی و کمربند خرپایی، در شکل (۱۰) سه مهار بازویی و کمربند خرپایی و در شکل (۱۱) تحت چهارمهاربازویی و کمربند خرپایی قرار دارد.



شکل ۸ مقایسه تغییر مکان جانبی سازه ۶۰ طبقه با ۱ مهار بازویی و کمربند خرپایی تحت بارگذاری‌های مختلف

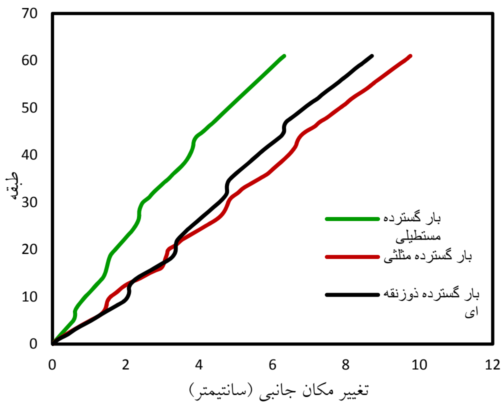


شکل ۹ مقایسه تغییر مکان جانبی سازه ۶۰ طبقه با ۲ مهار بازویی و کمربند خرپایی تحت بارگذاری‌های مختلف

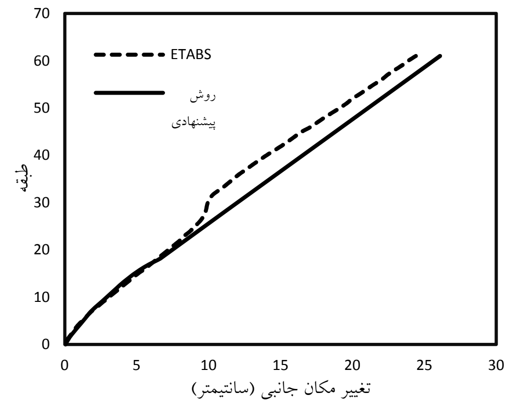


شکل ۱۰ مقایسه تغییر مکان جانبی سازه ۶۰ طبقه با ۳ مهار بازویی و کمربند خرپایی تحت بارگذاری های مختلف

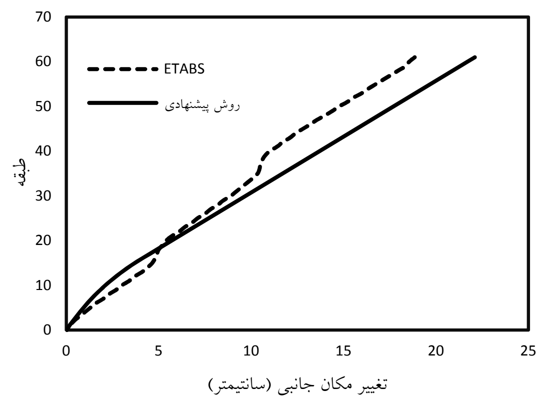
سازه مورد نظر با استفاده از روش پیشنهادی تحلیل شده و نتایج حاصل از روش پیشنهادی با نتایج حاصل از نرم‌افزار ایتبس مقایسه شده است. نتایج به دست آمده در شکل‌های (۱۲) تا (۱۵) نشان داده شده است.



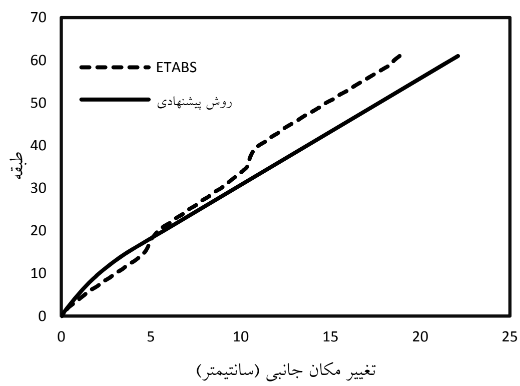
شکل ۱۱ مقایسه تغییر مکان جانبی سازه ٦۰ طبقه با ٤ مهار بازویی و کمربند خرپایی تحت بارگذاری های مختلف



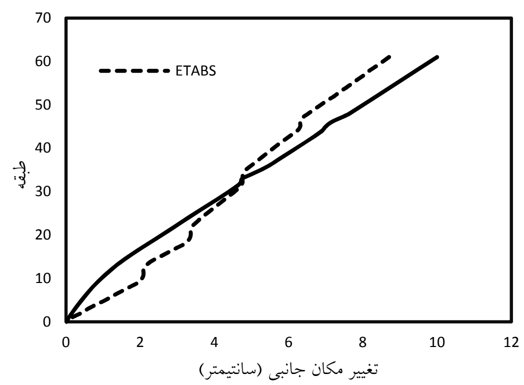
شکل ۱۲ تغییر مکان جانبی سازه ٦۰ طبقه با ۱ مهار بازویی و کمربند خرپایی تحت بارگسترده ذوزنقه‌ای



شکل ۱۳ تغییر مکان جانبی سازه ٦۰ طبقه با ۲ مهار بازویی و کمربند خرپایی تحت بارگسترده ذوزنقه‌ای



شکل ۱٤ تغییر مکان جانبی سازه ٦۰ طبقه با ۳ مهار بازویی و کمربند خرپایی تحت بارگسترده ذوزنقه‌ای



شکل ۱۵ تغییر مکان جانبی سازه ٦۰ طبقه با ٤ مهار بازویی و کمربند خرپایی تحت بارگسترده ذوزنقه‌ای

نتیجه گیری

در این مقاله موقعیت بهینه مهارهای بازویی و کمربندهای خرپایی صلب با استفاده از معیار انرژی تحت بارگذاری‌های گسترده یکنواخت، گسترده مثلثی و گسترده ذوزنقه‌ای بررسی گردیده است.

با مطالعه تحقیقات انجام شده توسط محققین در خصوص محل بهینهٔ مهار بازویی و کمربند خرپایی، ملاحظه می‌شود که معیار مورد استفاده جهت محاسبه موقعیت بهینه، حداقل شدن تغییر شکل‌های بالای سازه می‌باشد. این معیار، وضعیت یک نقطه خاص از سازه را مدنظر قرار می‌دهد، لذا به‌نظر می‌رسد معیار جامعی نباشد. بنابراین اگر بتوانیم معیاری بیابیم که شرایط یک نقطه خاص را مدنظر قرار ندهد، نتایج دقیق‌تری حاصل خواهد شد. در این پژوهش با استفاده از معیار انرژی که یکی از معیارهای قابل اعتماد در مباحث مهندسی می‌باشد، موقعیت بهینهٔ مهار بازویی و کمربند خرپایی در وضعیت‌های مختلف تعیین گردید. سازه موردنظر با یک سری فرضیات ساده شونده به عنوان یک سازه پیوسته مدل شده است. با توجه به تحلیل‌های تئوری و نتایج عدی، نتیجه گیری‌های اصلی این مقاله به شرح زیر خواهد بود:

۱. با افزایش q/q' در بارگذاری گسترده ذوزنقه‌ای، موقعیت بهینه مهار بازویی و کمربند خرپایی به سمت پایین سازه حرکت می‌کند. از این‌رو محل بهینه مهارهای بازویی و کمربندهای خرپایی تحت بار گسترده مثلثی، تمایل به حرکت به بالای ارتفاع سازه و تحت بار گسترده مستطیلی، تمایل به حرکت به پایین سازه را دارند.

۲. موقعیت بهینهٔ یک، دو، سه و چهار مهار بازویی و کمربند خرپایی صلب، تحت سه نوع بارگذاری گسترده یکنواخت، مثلثی و ذوزنقه ای با معیار انرژی محاسبه شد و نتایج حاصله نشان می‌دهد که معمولاً بهترین محل مهار بازویی و کمربند خرپایی در حدود ۰/۷–۰/٤ ارتفاع، از پای سازه می‌باشد.

مراجع

1. Zhou, Y., and Hexian Li., "Analysis of a high-rise steel structure with viscous damped outriggers", The Structural Design of Tall and Special Buildings, Vol. 23, No. 13, PP. 963-979, (2014).
2. Mir M., and Sun Moon, K., "Structural developments in tall buildings: current trends and future prospects", Architectural Science Review, Vol. 50, No. 3, PP. 205-223, (2007).
3. Taranath, B. S., "Optimum belt truss location for high-rise structures", Structural Engineer, Vol. 53, No. 8, PP. 18-21, (1975).
4. McNabb, J. W., and Muvdi, B. B., "Drift reduction factors for belted high-rise structures", *AISC Engineering Journal,* 3rd Quarter , PP. 88-91, (1975).
5. Smith, B. S., and Salim, I., "Parameter study of outrigger-braced tall building structures", *Journal of the Structural Division,* Vol. 107, No. 10, PP. 2001-2014, (1981).
6. Ding, J. M., "Optimum belt truss location for high-rise structures and top level drift coefficient", *Journal of Building Structures 4,* PP. 10-13, (1991).
7. Zhu, Y. L., "Inner force analysis of frame–core structure with horizontal outrigger belts", *Journal of Building Structures,* Vol. 10, PP. 10-15, (1995).
8. Zhang, Z. G., et al. "Studies on structural performance of ultra high-rise building with outrigger

belts", *Journal of Building Structures,* Vol. 17, No. 4, PP. 2-9, (1996).

9. Wu, J. R., and Q. S. Li., "Structural performance of multi-outrigger-braced tall buildings", The Structural Design of Tall and Special Buildings, Vol. 12, No. 2, PP. 155-176, (2003).
10. Rahgozar, R., and Sharifi, Y., "An approximate analysis of combined system of framed tube, shear core and belt truss in high-rise buildings", The Structural Design of Tall and Special Buildings, Vol. 18, No. 6, PP. 607-624, (2009).
11. Halis, G. M., and EmreIlgin, H., "A proposal for the classification of structural systems of tall buildings." Building and environment, Vol. 42, No. 7, PP. 2667-2675, (2007).
12. Deng, Kailai, et al. "A simplified model for analysis of high-rise buildings equipped with hysteresis damped outriggers." The Structural Design of Tall and Special Buildings, Vol. 23, No. 15, PP. 1158-1170, (2014).
13. Rutenberg, A., and D. Tal., "Lateral load response of belted tall building structures", Engineering Structures, Vol. 9, No. 1, PP. 53-67, (1987).
14. Hoenderkamp, J. C. D., "Shear wall with outrigger trusses on wall and column foundations", The structural design of tall and special buildings, Vol. 13, No. 1, PP. 73-87, (2004).
15. Hoenderkamp, J. C. D., and Bakker, M. C. M., "Analysis of high-rise braced frames with outriggers", The Structural Design of Tall and Special Buildings, Vol. 12, No. 4, PP. 335-350, (2003).

۱۷. خیرالدین علی. آرامش سیما. " سیستم‌های مقاوم سازه‌ای در ساختمان‌های بلند" چاپ اول. انتشارات دانشگاه سمنان، (۱۳۹۱).

16. Jahanshahi, M. R., and Rahgozar, R., "Optimum Location of Outrigger-belt Truss in Tall Buildings Based on Maximization of the Belt Truss Strain Energy", *International Journal of Engineering-Transactions A: Basics,* Vol. 26, No. 7, (2013).
17. Taranath, B. S., "Structural Analysis and Design of Tall Buildings", (1988).
18. Taranath, B. S., "Steel, concrete, and composite design of tall buildings", New York: McGraw-Hill, (1998).